

高速ディーゼル機関の燃焼と排気に関する研究*

(第1報, 排気 NO_x の低減)

石田 正弘^{*1}, 泉 修平^{*2}, 吉村 良孫^{*3}
末次 秀雄^{*2}, 植木 弘信^{*1}

Studies on Combustion and Exhaust Emissions in a High Speed Diesel Engine (1st Report, Reduction in Exhaust NO_x)

Masahiro ISHIDA, Shuhei IZUMI, Yoshihiro YOSHIMURA,
Hideo SUETSUGU, and Hironobu UEKI

The authors have been conducting studies on the reduction of exhaust emissions using a high speed diesel engine with a bore of 110 mm and a maximum speed of 2 500 rpm. By applying composite countermeasures consisting of five items: 1) timing retard, 2) optimization of fuel injection system, 3) water-in-oil type emulsified fuel, 4) application of ignition improver and 5) an increase in air flow quantity, an exhaust NO_x level about a half of the original was attained while retaining the original low levels of fuel consumption, smoke density and engine noise. Especially, in combustion tests on water-in-oil type emulsified fuel, it is clearly demonstrated that not only exhaust NO_x but also smoke density are significantly reduced due to an increase in the excess air ratio of the fuel spray.

Key Words: Diesel Engine, Combustion, Exhaust Emission, Emulsified Fuel, Excess Air Ratio

1. ま え が き

近年船用ディーゼル機関の分野では、船舶建造の落ち込みに伴い、ディーゼル機関の需要が減少し、一方、発展途上国などにおいては局所的なディーゼル発電が見直され、このため高出力率でかつ低燃費の船用ディーゼル機関を陸用機関として利用することが検討されている。陸用機関としては、大気汚染の観点から煙、排気 NO_x 、排出微粒子などの有害排気物質が制約を受け、かつ低燃費のエンジンが要求される。種々ある排気物質低減方法の中で、例えば水添加乳化油を用いる方法は燃費を悪化させずに NO_x ならびに煙濃度を同時に低減できる点で他の方法より優れており、これに関する研究は多い^{(1)~(6)}。

本研究では、直接噴射式高速小形船用ディーゼル機関を用いて、排気物質、主として NO_x の低減対策を追究した。排気 NO_x 低減のため一般に噴射時期遅延の手段が用いられるが、ここではこの他燃料噴射システムの適正化、水添加乳化油および着火促進剤の活用、

ならびに空気流量増大等の個々の対策が NO_x 生成に及ぼす影響を燃焼との関係において考察し、かつ良好な機関性能を維持しつつ排気 NO_x を低減するための総合的対策を追究した。

2. 供試燃油および供試機関

供試燃油には小形高速機関が常用する粘度 3.7 cSt @50°C の A 重油 (記号 A 40) に水を 0~20 % 添加したものを使用した。燃油と水との混合には電動かくはん機を用い、水の粒径が 5 μm 以下になっていることを顕微鏡で確認した。ただし混合には乳化剤を 0.5~1 % 添加し、また水の添加率は乳化油全量に対する水の体積割合で定義した。

供試機関は漁船用高速小形過給ディーゼル機関〔三菱重工業(株)製, type 3 AAC-1, 110 mm×125 mm, 84.5 kW {115 PS}/2 500 rpm, 3 気筒)である。ピストンはトロイダル形燃焼室を有し、その直径は 68 mm である。供試ノズルとして表 1 に示す噴孔径および噴孔数が異なる種々のノズルを用いた。実験では機関の回転数およびトルクを設定値の $\pm 0.5\%$ 以内の精度で整定させ、給気、冷却水、燃油の各温度は設定値 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 以内の精度を保った。微妙な燃焼の変化を正確に把握するため、筒内圧力を基本とした燃焼モード、

* 昭和 62 年 10 月 25 日 九州・中国四国支部熊本地方講演会において講演, 原稿受付 昭和 62 年 2 月 2 日。

^{*1} 正員, 長崎大学工学部 (〒852 長崎市文教町 1-14)。

^{*2} 正員, 長崎総合科学大学工学部 (〒851-01 長崎市網場町 536)。

^{*3} 准員, 長崎大学工学部。

振動、騒音、機関性能、熱負荷、熱収支などについて個々にかつ総合的に燃焼を評価した。

3. 実験結果および考察

3・1 燃料噴射系変化 図1および図2は噴射時期を変化させたときの機関性能および燃焼モードを示す。負荷は船用特性曲線上の85%であり、実噴射時期はそれぞれ13.8, 11.1, 9.0°BTDCである。図中の T_s は給気温度、 T_{c2} は冷却水温度、 $P_{N\max}$ はノズル最高噴射圧力、 P_{\max} は最高燃焼圧力、 q_a は空気消費率、 P_s は給気圧力、 N_B は過給機回転数、 T_e はタービン入口温度、 T_1 はトップリング位置でのライナ温度、 NO_x は窒素酸化物濃度、 D_s は煙濃度および b_e は燃費率を表す。噴射時期を約5°遅延することにより NO_x は約450 ppm低減され、その低減効果は極めて大きい。燃費率は11°BTDCのとき164.2 g/PSHで最低であり、これより2°遅延することによって燃費率は1 g/PSH増加するが、 NO_x は230 ppm低減される。図2に示すように、噴射時期遅延によって熱発生開始点が遅れ、最高燃焼圧力 P_{\max} 、および予混合燃焼の熱発生率が減

少するため、筒内平均ガス温度 T_{gm} および燃焼域の断熱燃焼温度 T_b がともに減少し NO_x 生成率が減少する。なお、 T_b および NO_x 生成率は、文献(7)の方法により計算した**1。

図3はノズルの噴孔数を5穴とし、噴孔径を0.31(5 A) 0.29 (5 B), 0.27 (5 C) mmと減少したときの機関性能を示す。噴孔径の減少に伴い、燃費率および排煙濃度はほぼ一定であるが NO_x 濃度が著しく増加している。この場合、実噴射時期がノズル5 A, 5 B, 5 Cの順に11.1°, 12.6°, 14.2° BTDCと早くなり、前述の噴射時期遅延と逆の効果が主たる原因で NO_x 濃度が増加しており、噴孔径差の影響は明確でない。

図4に水添加率の影響と同時にノズル開弁圧力が機関性能に及ぼす影響を示した。開弁圧力を220 barから250 barに上昇することによって、機関性能はほとんど変化しないが NO_x 濃度が減少している。すなわち開弁圧力上昇により噴霧の霧化が改善されるとともに実噴射時期がわずかに遅れるため、水添加率0, 10, 20%のとき、それぞれ120, 110, 50 ppmだけ低減されている。

表1 供試ノズル諸元

Type	Hole No.	Hole Dia.	Area Ratio
5A	5	0.31(mm)	1.00
4B	4	0.32 "	0.85
5B	5	0.29 "	0.88
6B	6	0.26 "	0.84
5C	5	0.27 "	0.76

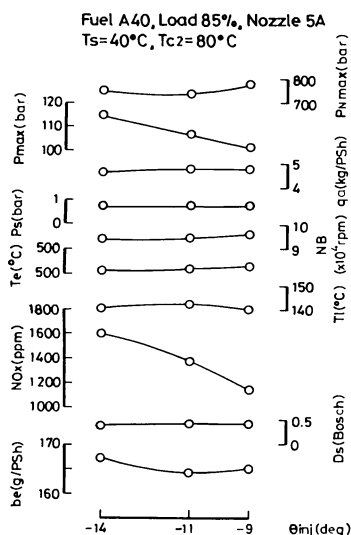


図1 機関性能 (噴射時期変化)

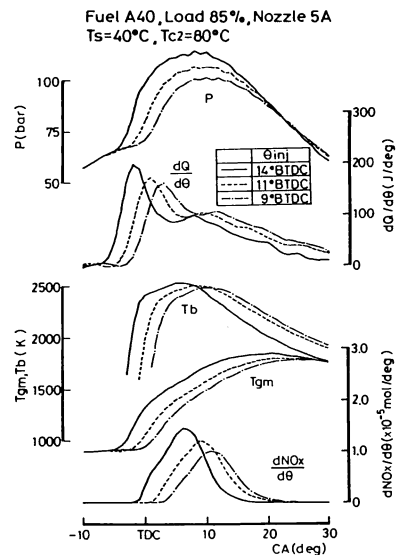


図2 燃焼モード (噴射時期変化)

**1 文献(7)の方法に従って、予混合燃焼域の空気過剰率 λ_b を仮定し、実測の筒内圧力から求める筒内平均ガス温度 T_{gm} 、熱発生率 $dQ/d\theta$ を用いて燃焼域断熱燃焼温度 T_b を求め、この T_b と初期酸素および窒素モル数から NO_x 生成率 $d\text{NO}_x/d\theta$ およびその生成期間 θ_{NO_x} で積分した NO_x 生成量(mol)を算定する。 NO_x 生成量と排ガス重量 G_{exh} から算定される NO_x 濃度(ppm)が実測値と0.5%の精度で一致するまで λ_b を変化して繰返し計算を行う。なお、任意のクランク角における燃料を含むガス重量の算定のため、実測の噴射圧から求める噴射率を用いている。

3・2 水添加率変化 図4には85%負荷で燃油A40に水を添加したときの機関性能の変化を示している。水添加率の増加とともにノズル最高噴射圧力 P_{Nmax} 、筒内最高燃焼圧力 P_{max} 、トップリング位置ライナ温度 T_l は上昇し、排気温度 T_e 、 NO_x 濃度、煙濃度 D_s は減少する。燃費率は水添加率によってほとんど変化していないが、水20%添加のとき燃費率が約1g/PSh増加し、 NO_x 濃度は開弁圧力220、250 barに対してそれぞれ190、140 ppm低減されている。

図5は燃焼モードに及ぼす水添加の影響の一例を開弁圧力が220 barの場合について示す。水添加により着火遅れが増大し、予混合燃焼量が増加するため筒内圧力および筒内平均ガス温度が著しく上昇するが、後述のように噴霧空気過剰率の増加により、燃焼域燃焼温度 T_b が低下し、 NO_x 生成率が減少したと考えられる。

3・3 着火促進剤添加率変化 水20%を含む乳化A重油に対し、着火促進剤(オクチルナイトレイト: 記号XB)を添加した場合の機関性能および燃焼モードの変化を図6および図7に示す。燃費率および煙濃度をほとんど変化させることなく、わずか0.8%の着火促進剤の添加により NO_x 濃度が110 ppm低減された。着火促進剤添加率の増加に伴い、着火が早くなり、圧力上昇率および熱発生率の最大値が減少する。着火遅れの短縮によって予混合燃焼量が減少するため、予混合燃焼期間の筒内平均ガス温度 T_{gm} および燃焼域燃焼温度 T_b が若干減少し、 NO_x 生成量が減少すると考えられる。なお着火促進剤添加の効果は、 NO_x 濃度の低減よりも機関の振動、騒音の低減において著し

い。

3・4 給気圧力変化 電動ブロワにより給気圧力を標準大気圧から0.05、0.1 bar上昇させたときの機関性能および NO_x 特性を図8および図9に示す。給気圧力を0.1 bar上昇させることによって、燃費率は2.2 g/PSh、煙濃度は0.05 Bosch、 NO_x 濃度は130 ppm減少した。給気圧力上昇による予混合燃焼量の変化は小さく、空気量の増大によって筒内平均ガス温度 T_{gm} が低下し、図9の NO_x 特性の示すように燃焼域

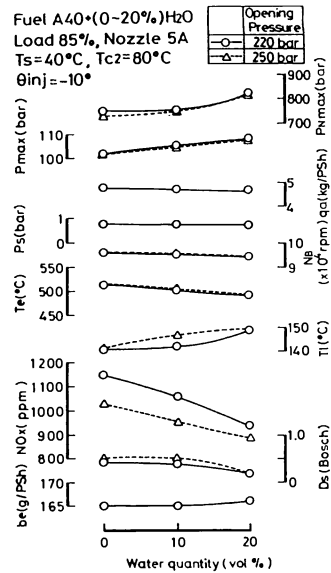


図4 機関性能(水添加率およびノズル開弁圧力変化)

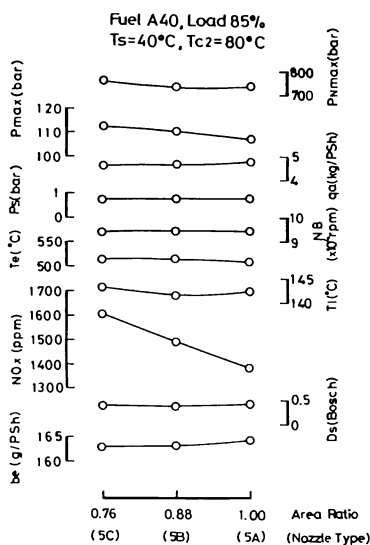


図3 機関性能(ノズル変化)

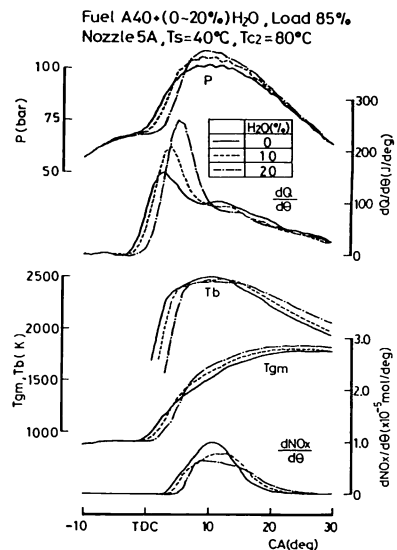


図5 燃焼モード(水添加率変化)

燃焼温度 T_b が低下する。また NO_x 生成期間 θ_{NO_x} も短縮される。しかし、空気量に比例した筒内初期窒素量 N_2 および酸素量 O_2 (mol) の増加により、 T_b の減少による NO_x 低減効果が相殺されて NO_x 生成量 (mol) はほとんど減少しない。しかるに空気量すなわち、排ガス重量 G_{exh} の増加による希釈効果のため排ガスにおける NO_x 濃度が減少する。

4. 水添加による NO_x 低減効果に関する考察

噴霧空気過剰率が NO_x 濃度に及ぼす影響を調べるため、ノズル噴孔面積を一定に保ち、噴孔数がそれぞ

れ 6, 5, 4 穴のノズル 6 B, 5 B, 4 B について、85 % 負荷で水添加率を変化させて実験を行った。図 10 はこのときの着火遅れ $\Delta \tau_i$ 、着火時期でのペネトレーション X_i 、着火時期での噴霧先端空気過剰率 λ_i および NO_x 濃度を示す。着火遅れは噴射開始時期から、熱発生率曲線が急激に立ち上って $dQ/d\theta=0$ を横切る時期までとした。 X_i および λ_i は水添加率の影響を考慮したうえで和栗ら⁽⁸⁾の式で計算した。ペネトレーション X_i が衝突距離 34 mm を超えるものについては、衝突距離における λ_i を求めた。水の添加によってペネトレー

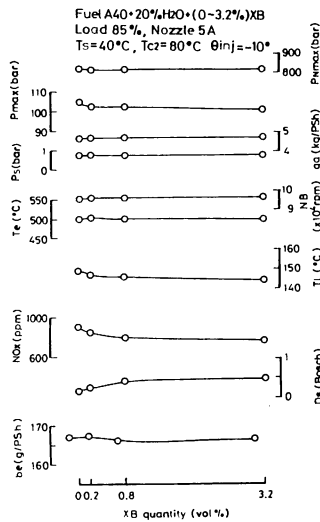


図 6 機関性能 (着火促進剤添加)

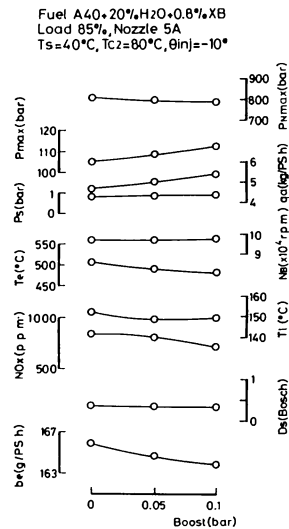


図 8 機関性能 (給気圧力変化)

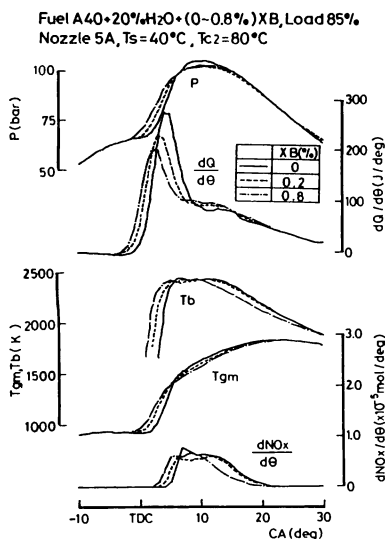


図 7 燃焼モード (着火促進剤添加)

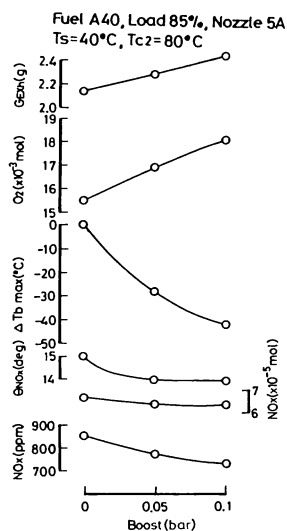


図 9 NO_x 特性 (給気圧力変化)

ションおよび噴霧先端空気過剰率はそれぞれ増加し、 NO_x 濃度は減少している。

図 11 は NO_x 濃度を噴霧先端空気過剰率 λ_i についてプロットしたものである。図 11 には図 10 に示した 85 % 負荷におけるノズル 4 B, 5 B, 6 B の場合、および 50 % 負荷におけるノズル 5 B の場合に加えて、粘度 181 cSt@50°C の C 重油に水を 0, 5, 10, 15, 20 % 添加した乳化油の 85 % 負荷におけるノズル 5 A の場合について示した。静的圧送開始時期を一定に保っているにもかかわらず使用するノズルによって実噴射時期が多少変化するためデータに多少のばらつきが見られるが、 NO_x 濃度が λ_i の増加とともに直線的に減少する傾向が明りように表れている。

図 12 は、文献(7)の方法において、実測の NO_x 濃度を与えるに必要な予混合燃焼の空気過剰率 λ_b と、

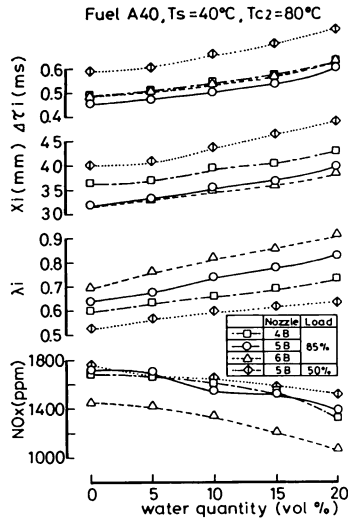


図 10 水添加による噴霧空気過剰率の変化

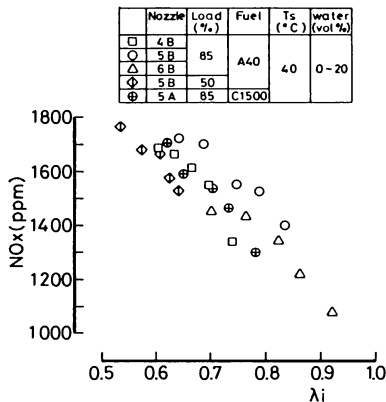


図 11 噴霧空気過剰率と NO_x 濃度の相関

一方、ベネトレーションから算定される噴霧先端空気過剰率 λ_i との関係を示す。図 12 では λ_b および λ_i を水添加率 0 % のときの値 λ_{b0} および λ_{i0} でそれぞれ除した値で示している。 λ_b は λ_i の値より大きい。水添加率増加に伴う λ_b と λ_i の増加率がほぼ一致しており、水添加による NO_x 濃度の減少は、噴霧空気過剰率の増大が主たる原因と判断される**2。

図 13 はノズル 6 B, 5 B, 4 B について 85 % 負荷での燃焼期間、排気温度 T_e および煙濃度比 D_s^* の水添加率による変化を示す。ここでは熱発生量が全熱発生量の 99 % となる時期を燃焼終わりとして燃焼期間を

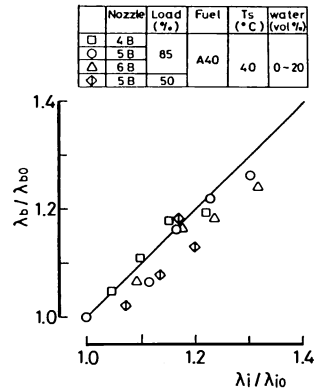


図 12 噴霧空気過剰率と予混合燃焼域空気過剰率

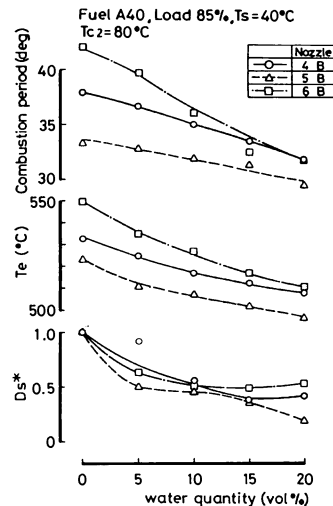
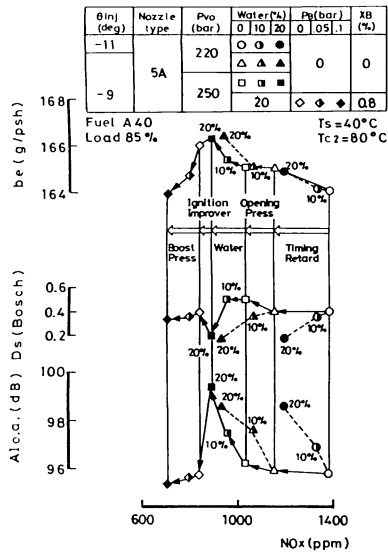


図 13 燃焼期間、排気温度および煙濃度

**2 着火時の噴霧先端空気過剰率 λ_i は、あくまで和栗らの式⁽¹⁾から推定される値で、噴霧先端断面内の平均過剰率である。図 11 の場合その値は 1.0 より小さいが文献(7)の方法によって算定される予混合燃焼域の空気過剰率 λ_b は λ_i の約 2 倍程度ですべて 1.0 以上であった。

図 14 NO_x 低減総合対策結果

定義した。水 20 % 添加により、燃焼期間はノズル 6 B, 5 B, 4 B でそれぞれ 10, 4, 6°C 短縮され、排気温度もそれぞれ 39, 27, 21°C 低下している。また煙濃度は水を 10 % 以上添加することにより半減される。これらはすべて水添加により燃焼が著しく改善されるためと考えられる。

5. NO_x 低減の総合的対策およびまとめ

前述の NO_x 低減のための個々の対策を総合して適用した結果、初期の燃費率、煙濃度、騒音のレベルをそれぞれ維持したまま NO_x 濃度を 1380 ppm から 710 ppm まで約 50 % 低減することができた。図 14 は

NO_x 濃度低減過程における燃費率、煙濃度および騒音（音響インテンシティ：AI）の変化を示す。対策は 5 項目から成り、それぞれの NO_x 低減量は次のとおりである。

対策項目	具体的対策	NO_x 低減量 (ppm)
1	噴射時期遅延 11°→9°BTDC	230
2	開弁圧力上昇 220→250 bar	120
3	水添加乳化油 水 20 % 添加	140
4	着火促進剤 XB 0.8 % 添加	50
5	給気圧力 0.1 bar 上昇	130

なお水添加乳化油の燃焼においては、噴霧内の空気過剰率が増加するため、燃焼が改善され煙濃度が低減されるとともに NO_x 生成量も減少することが明らかになった。

終わりにご協力をいただいた三菱重工業(株)、モービル石油(株)、タイホー工業(株)、協和発酵(株)、(株)小野測器の関係各位に謝意を表すとともに、本研究の遂行に当たり、大学院学生であった手島明君、植松真一郎君、松下公彦君らの多大の貢献があったことを記して謝意を表します。また、校閲委員のご指摘により、一部加筆訂正したことを記して謝意を表する。

文 献

- (1) 中川・立石, 機誌, 81-720 (昭 53), 1201.
- (2) 塚原・ほか 2 名, 機論, 48-428, B (昭 57), 802.
- (3) 廣安・ほか 2 名, 機論, 48-430, B (昭 57), 1182.
- (4) 廣安・ほか 2 名, 機論, 48-433, B (昭 57), 1811.
- (5) Thompson, R. V., *Proc. 3rd ISME Tokyo '83*, C-2-1 (1983-10), 405.
- (6) Okada, H., *Proc. 16th CIMAC*, D-77 (1985-6).
- (7) 畠山, 三菱重工技報, 12-3 (昭 50), 341.
- (8) 和栗・ほか 3 名, 機論, 25-156 (昭 34), 820.

討 論

〔質問〕 和栗 雄太郎〔九州大学工学部〕

(1) 水添加に伴う噴霧の持込み運動量の増加により、点火時における噴霧先端の空気過剰率が増加し、火炎温度が低下するため NO_x が低下するという貴説に賛成する。しかし同じ論法で考えるならば、ブーストを上げたときにも同様の効果があると考えられるが、貴説では単に空気流量の増加による希釈とされている。その点に関してご説明いただきたい。

(2) 水添加による NO_x の低減効果については理解できたが、貴研究では煙濃度も減少している。それに関連して SOF はかえって増加することはないか。

〔回答〕 (1) 水添加に伴う噴霧先端空気過剰率の増加は主として二つの要因による。一つは着火遅れ増大によるペネトレーションの増加に基づくもの、今一つは ϵ を燃料に対する水の重量割合とすると、噴霧中に含まれる水分は空気を消費しないため、純燃料に対する空気過剰率は水を含まない場合の $1+\epsilon$ 倍になる。この二つを比べると後者のほうが噴霧先端空気過剰率の増大に寄与している。

一方、ブースト圧を上昇すると着火遅れが短くなるし空気密度が増加するため、ペネトレーションが減少する。したがって噴霧先端空気過剰率はかえってわず

かではあるが減少する傾向になると考えられる。本実験の場合、ブーストによる NO_x 生成量の変化は小さく、 NO_x 濃度の減少は希釈効果と判断した。

(2) 現在 NO_x と合わせて排気微粒子の計測を開

始したばかりでデータの蓄積が少ないため正確な議論はできないが、デクロールメタン溶解成分を SOF とすれば、SOF は水添加によって減少する傾向はないようである。

53 巻 496 号, B 編 (昭 62-12) 正誤表

執筆者名	ページ	欄	行	誤	正
西脇一字	3491	右	4	and and	and
	〃	右	23	850467	860467
増田 渉 ほか	3558	図 5	図中	$P_5(14)$	$P_5(15)$
	〃	図 6	〃	$P_7(14)$	$P_7(15)$
	〃	図 7	〃	$P_{10}(14)$	$P_{10}(15)$
	〃	図 8	〃	$J=14$	$J=15$
難波昌伸 ほか	3585	左	11	逆に balk react-	逆に bulk react-
白浜芳朗 ほか	3666	左	下 8	$\beta=(\rho/2)\Delta SC_f=\cdots$	$\beta=(\rho/2)uSC_f=\cdots$
井上雅弘 ほか	3697	右	文 献 (7)	…機論50-461	…機論51-461
			文 献 (10)	…機論50-468	…機論51-468
薦原道久 ほか	3712	右	2	$2h/\pi r$	$2h/\pi$
藤田尚毅 ほか	3825	図 6	図説	含水率と燃焼温度	NO_x 濃度と含水率
	〃	図 7	〃	NO_x 濃度と含水率	含水率と燃焼温度